



CENTRO DE INVESTIGACIONES  
EN OPTICA, A.C.

**“DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UN ARREGLO  
HOLOGRÁFICO DIGITAL A PARTIR DE  
RESULTADOS PRELIMINARES DEL FENÓMENO DE  
LENTE TÉRMICA”**



Tesis que para obtener el grado de Maestra en Ciencias (Óptica)

***Presenta: Jhoanna Granados Ruiz***

*Director de Tesis: Dr. Jorge Mauricio Flores Moreno*

*León · Guanajuato · México*

*Diciembre 2024*



# Desarrollo y validación de un arreglo holográfico digital a partir de resultados preliminares del fenómeno de lente térmica

Tesis presentada por

**Jhoanna Granados Ruiz**

como requisito para obtener el grado de

*Maestra en Ciencias (Óptica)*

Asesor:

Jorge Mauricio Flores Moreno

Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.

León, Guanajuato.

Diciembre 2024

© 2024 — Jhoanna Granados Ruiz

Todos los derechos reservados

## **Desarrollo y validación de un arreglo holográfico digital a partir de resultados preliminares del fenómeno de lente térmica**

### **Resumen**

El fenómeno de lente térmica en medios líquidos, inducido por gradientes térmicos generados por la interacción de un láser con el medio, ofrece una herramienta versátil para estudiar las propiedades térmicas y ópticas de materiales. Este trabajo analiza los cambios de fase asociados a dicho fenómeno utilizando holografía digital como técnica no invasiva.

El estudio emplea un sistema holográfico basado en un interferómetro de Mach-Zehnder, utilizando un láser continuo de 532 nm para la excitación térmica del medio y un láser de 632 nm para la captura de hologramas. La holografía digital permite obtener información tridimensional del frente de onda, incluyendo la fase, lo que hace posible cuantificar las variaciones en el índice de refracción generadas por el gradiente térmico.

A través de esta técnica, se analizan los cambios de fase en una muestra de etanol al 95 %, un medio líquido ampliamente estudiado por sus propiedades térmicas. Este enfoque destaca por ser no invasivo, preciso y adaptable, ofreciendo una plataforma experimental robusta para estudiar fenómenos de deformación dinámicos en medios transparentes.

La presente investigación contribuye al desarrollo de metodologías avanzadas para la caracterización óptica y en un futuro mecánica, con aplicaciones potenciales para la caracterización de biomateriales. Este trabajo establece una base para futuras investigaciones que exploren nuevas configuraciones holográficas y el estudio de distintas señales de excitación controlada para determinar algunas propiedades ópticas y mecánicas.

# Índice general

Resumen	II
Agradecimientos	v
Dedicatoria	VI
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Fundamentos de Holografía Aplicada para observar cambios de fase en Medios Líquidos</b>	<b>5</b>
2.1. Principios de la Holografía . . . . .	5
2.1.1. Coherencia y Monocromaticidad en Holografía . . . . .	5
2.1.2. Interferencia y Difracción . . . . .	6
2.2. Interferometría Holográfica Digital para el Análisis de Cambios de Fase	9
2.2.1. Método de Doble Exposición . . . . .	10
2.2.2. Configuración Off-Axis en Holografía Digital . . . . .	11
2.2.3. Interferómetro de Mach-Zehnder en Holografía Digital . . . . .	12
2.3. Captura y Reconstrucción de Hologramas Digitales . . . . .	14
2.3.1. Proceso de Captura . . . . .	14
2.3.2. Algoritmos de Reconstrucción . . . . .	15
2.4. Modelo teórico del cambio de fase inducido por lente térmica . . . . .	19

## ÍNDICE GENERAL

<b>3. Diseño experimental</b>	<b>21</b>
3.1. Montaje Experimental . . . . .	21
<b>4. Resultados y discusión</b>	<b>25</b>
4.1. Hologramas y procesamiento . . . . .	25
4.2. Comparación entre resultados teóricos y experimentales . . . . .	29
4.2.1. Análisis del cambio de fase tras 10 segundos de excitación . . .	29
4.2.2. Dinámica del Cambio de Fase Posterior a la Excitación Térmica	30
4.3. Cambios de fase: análisis teórico y limitaciones experimentales . . . .	33
<b>5. Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>37</b>

# Agradecimientos

Dar las gracias siempre ha sido uno de los mayores retos de expresión. Intentamos encontrar las palabras adecuadas para reflejar, aunque sea un poco, todo lo que las personas han hecho para que algo sea posible. Por eso, quiero tomarme el tiempo para escribir estas líneas.

Primero, quiero agradecer a mi familia. Mamá, gracias por ser mi ejemplo de resiliencia. Tu templanza y fortaleza para superar los problemas son un ejemplo que llevo conmigo siempre. Papá, gracias por siempre estar, por ser un ejemplo de lealtad y amor. Gracias por apoyar mis sueños y ambiciones. Gracias a ambos por creer en mí, ayudarme e impulsarme a mejorar y alcanzar nuevas alturas.

Hermanas, Mariana y Dayanne, mis compañeras de vida. Gracias por estar siempre, por aportar su granito de arena en los momentos clave, y por enseñarme a ver las cosas desde otras perspectivas. Cada una, con su manera particular de ser, ha sido una parte importante de este camino, ofreciendo apoyo, motivación y compañía en cada etapa. Su presencia ha sido una constante que valoro profundamente.

Daniel, mi cómplice, guía y soporte. Gracias por tanto; las palabras no son suficientes para expresar cuánto valoro tu existencia y el apoyo incondicional que me has brindado durante estos años. A cada uno de mis seis furiosos, porque aunque no puedan entender estas palabras, no saben la inmensa felicidad que me brindan. Durante este tiempo, han sido mis compañeros en desvelos, estrés y tantas otras experiencias. Gracias por darle propósito y alegría a mi vida. Por último, gracias a mis suegros, Sandra y Miguel, por su apoyo, que hizo esta experiencia mucho más llevadera.

A continuación, quiero expresar mi agradecimiento a los profesores e investigadores que formaron parte de mi formación durante esta etapa. Gracias por su guía y compartir sus conocimientos. Agradezco especialmente a mi asesor, el doctor Mauricio Flores, cuya experiencia y consejos han sido un gran apoyo y guía durante este proceso.

A CONAHCYT, por el apoyo económico durante estos dos años, demostrando que el respaldo a la ciencia y la educación puede transformar vidas y abrir puertas hacia nuevas oportunidades.

Finalmente, a todos aquellos que, de una manera u otra, contribuyeron a este proceso. Cada palabra de aliento, cada lección y cada momento compartido han dejado una huella imborrable en este camino.

*A mis padres, mis hermanas, Daniel y los seis furiosos. Gracias por formar parte de esta travesía, por ustedes esto fue posible.*

# Capítulo 1

## Introducción

Cuando se menciona la palabra “holografía”, comúnmente se piensa en proyecciones tridimensionales de objetos que parecen “flotar” en el espacio, similares a las representaciones de la ciencia ficción. Sin embargo, el concepto de holografía tiene una base científica más compleja, vinculada al registro y reconstrucción de frentes de onda luminosos. Esta técnica captura una imagen que codifica las características tridimensionales del objeto capturado, incluyendo la intensidad y la fase del frente de onda, lo que permite reconstruir su forma, textura y profundidad.

La holografía fue introducida en 1947 por Dennis Gabor, quien buscaba mejorar la resolución de los microscopios electrónicos. Gracias a esto, desarrolló un método que permitía registrar tridimensionalmente la información óptica de un objeto mediante patrones de interferencia de luz [1, 2]. Este enfoque se diferenciaba de la fotografía convencional, que se limita a registrar únicamente la intensidad de la luz, al incluir además la fase de las ondas luminosas. Este componente adicional proporcionó información sobre la relación espacial entre las ondas, lo cual es necesario para la reconstrucción de imágenes tridimensionales.

El arreglo de Gabor para capturar sus primeros hologramas consistió en una configuración en línea (*on-axis*), donde el haz de referencia y el haz objeto compartían el mismo eje óptico y se superponían en el plano de registro. En este diseño, se utilizaba un único haz de luz, generado por una lámpara de mercurio, que primero iluminaba el objeto. El frente de onda reflejado o transmitido por el objeto, denominado haz objeto, interfería directamente con una porción del haz no modificado, conocido como haz de referencia, en una superficie fotosensible.

Aunque esta disposición permitió a Gabor demostrar la posibilidad de registrar hologramas y reconstruir imágenes tridimensionales, también presentaba limitaciones

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

importantes. Al compartir el mismo eje óptico, el haz de referencia y el haz objeto producían términos de difracción que se superponían en el plano de registro, introduciendo ruido visual y degradando la calidad del holograma.

La configuración *on-axis* marcó el inicio de la holografía al demostrar la posibilidad de registrar y reconstruir frentes de onda. Sin embargo, sus limitaciones, como la superposición de términos de interferencia que degradaban la calidad de las imágenes, evidenciaron la necesidad de diseños más avanzados [3].

Un avance importante en el desarrollo de la holografía fue el surgimiento del láser al inicio de la década de los 60, que ofreció una fuente de luz con propiedades ideales para esta técnica [4, 5]. El láser es una fuente de luz monocromática, que se caracteriza por emitir radiación con una única longitud de onda. Esta propiedad, junto con su coherencia, definida como la capacidad de mantener una relación de fase constante tanto en el tiempo como en el espacio, permitió obtener patrones de interferencia más definidos. Gracias a esto, fue posible registrar con precisión los detalles del frente de onda, lo que resultó fundamental para las aplicaciones holográficas [6]. Posteriormente, se introdujo la configuración *off-axis*, donde los haces de referencia y objeto se orientaron con un ángulo relativo entre ellos. Este diseño permitió separar espacialmente los términos de difracción, eliminando el ruido visual asociado con la configuración *on-axis* y mejorando significativamente la claridad y calidad de los hologramas [7, 8].

Con el tiempo, se incorporaron sensores electrónicos, como cámaras CCD y CMOS, que permitieron la captura de hologramas en formato digital. Esto dio origen a la holografía digital, eliminando la necesidad de medios fotosensibles tradicionales y procesos químicos para el almacenamiento de los hologramas. En esta técnica, la interferencia entre los haces objeto y referencia se registra de manera digital, y los hologramas resultantes son procesados mediante algoritmos computacionales. Aunque el principio fundamental para la captura de hologramas siguió siendo el mismo (la interferencia entre los frentes de onda objeto y referencia que genera un patrón de intensidad en el plano de registro), en la holografía digital, este patrón pasó a almacenarse como una matriz numérica, facilitando su análisis posterior [9, 10].

La digitalización de hologramas hizo posible implementar algoritmos computacionales como las transformadas de Fresnel, la convolución y el método del espectro angular. Estos algoritmos permitieron reconstruir hologramas con mayor flexibilidad y precisión, recuperando información tridimensional de forma eficiente [11]. Entre estos métodos, el espectro angular destaca por su alta precisión en la reconstrucción de hologramas, especialmente en distancias cortas, lo que lo hace

## *CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN*

particularmente adecuado para este trabajo.

La digitalización no solo facilitó la aplicación de algoritmos avanzados, sino que también permitió incorporar técnicas de filtrado y corrección de ruido, mejorando la nitidez y confiabilidad de las imágenes reconstruidas [12, 13].

La holografía digital se consolidó como una herramienta versátil en múltiples áreas, y su integración con la microscopía dio lugar a la microscopía holográfica digital. Esta técnica combinó los principios de la holografía con la capacidad de análisis a nivel microscópico, facilitando el estudio de fenómenos dinámicos y estructuras complejas en escalas micrométricas. Entre sus aplicaciones destacaron la visualización y medición de partículas, deformaciones y gradientes térmicos, lo que permitió la caracterización de sistemas dinámicos con una gran precisión [14, 15].

Dentro de este contexto, el fenómeno de la lente térmica es un ejemplo relevante de gradiente térmico aplicado, ya que permite estudiar cómo las variaciones de temperatura afectan las propiedades ópticas de un medio transparente [16, 17]. Este fenómeno es especialmente útil para evaluar sistemas de medición holográfica debido a su capacidad para generar deformaciones ópticas controladas.

El fenómeno de la lente térmica ocurre cuando un medio es sometido a un calentamiento localizado, lo que provoca la formación de gradientes de temperatura [18]. Aunque este calentamiento puede ser inducido por diversas fuentes de calor, como resistencias térmicas o reacciones químicas, el uso de un haz láser es especialmente adecuado para estudios ópticos, ya que permite un control preciso sobre la intensidad, posición y duración del calentamiento. Estos gradientes térmicos generan variaciones espaciales en el índice de refracción del medio, desviando o enfocando los rayos luminosos de manera similar a una lente óptica. Estas variaciones en el índice de refracción producen cambios de fase en el frente de onda, que pueden ser registrados y analizados para validar la sensibilidad y precisión del sistema holográfico.

En este trabajo, se empleó el fenómeno de lente térmica como modelo experimental para desarrollar y validar un arreglo holográfico digital. El sistema, basado en una configuración interferométrica tipo Mach-Zehnder, fue diseñado para capturar hologramas en transmisión, lo que permitió registrar los cambios de fase generados por el fenómeno. Este enfoque permitió estudiar deformaciones ópticas dinámicas y observar variaciones de fase.

Aunque el fenómeno de lente térmica sirvió como modelo físico para validar la utilidad y sensibilidad del sistema, el enfoque futuro se orienta hacia la caracterización de biomateriales mediante el uso de presión óptica. La capacidad

## *CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN*

del arreglo holográfico digital para detectar y medir deformaciones ópticas con alta precisión lo convierte en una herramienta prometedora para estudiar las propiedades mecánicas y estructurales de materiales biológicos, como los hidrogeles. En trabajos posteriores, se buscará implementar esta técnica para investigar cómo la presión óptica puede inducir deformaciones en biomateriales, permitiendo su caracterización de manera no invasiva y a escala microscópica.

Este documento está estructurado de manera que cada capítulo proporciona los fundamentos necesarios para comprender el desarrollo y los resultados de este trabajo. En el Capítulo 2, se presenta el marco teórico relacionado con las técnicas holográficas utilizadas, así como los principios ópticos y las configuraciones interferométricas que fundamentan el sistema desarrollado. El Capítulo 3 describe el montaje experimental, detallando la configuración empleada y las adaptaciones realizadas para implementar el arreglo holográfico digital y registrar el fenómeno de lente térmica. En el Capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos, acompañados de su discusión, con un enfoque en la validación del sistema mediante la medición de cambios de fase asociados al fenómeno de lente térmica. Finalmente, en el Capítulo 5 se exponen las conclusiones generales y las perspectivas futuras, destacando las posibles aplicaciones del sistema desarrollado en la caracterización de propiedades ópticas y mecánicas en biomateriales.

# Capítulo 2

## Fundamentos de Holografía Aplicada para observar cambios de fase en Medios Líquidos

### 2.1. Principios de la Holografía

Para comprender el proceso de captura y reconstrucción de hologramas, es necesario abordar conceptos clave de la radiación electromagnética en el rango visible, como la coherencia, la monocromaticidad y los fenómenos de interferencia y difracción. Estos conceptos no solo definen las condiciones óptimas para la obtención de hologramas de calidad, sino que también explican las bases matemáticas y físicas que sustentan el proceso holográfico.

#### 2.1.1. Coherencia y Monocromaticidad en Holografía

La coherencia y la monocromaticidad son propiedades de las fuentes de luz que influyen directamente en la generación de patrones de interferencia, los cuales son necesarios para el proceso holográfico. La coherencia, presente en las dimensiones temporal y espacial, desempeña un papel importante en la formación de patrones de interferencia. La coherencia temporal permite que las ondas de luz mantengan una relación de fase constante a lo largo del tiempo, asegurando una superposición estable entre el haz de referencia y el haz objeto. Por otro lado, la coherencia espacial asegura que el frente de onda presente una fase uniforme en distintos puntos del plano de propagación, lo que contribuye a la formación de patrones de interferencia

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

consistentes y bien definidos [19].

La monocromaticidad se refiere a la restricción de la fuente de luz a una sola longitud de onda o a un rango extremadamente reducido (concepto conocido como ancho de banda). Esta propiedad evita la generación de franjas de ruido por la superposición de múltiples longitudes de onda, lo que mejora la claridad del holograma. Mientras más estrecho sea el ancho de banda, mayor será la coherencia y más única la longitud de onda de la fuente. Aunque las fuentes monocromáticas han sido tradicionalmente las más utilizadas en holografía, investigaciones recientes también han explorado el uso de fuentes de baja coherencia o incluso de luz blanca [20, 21, 22]. Estas fuentes, con coherencia limitada, presentan ventajas en aplicaciones específicas donde es necesario mejorar la calidad de las reconstrucciones holográficas al evitar efectos asociados a la alta coherencia.

En este trabajo, se utilizó un láser como fuente de luz debido a sus propiedades de monocromaticidad y coherencia, que permiten obtener hologramas con precisión y detalle [11]. Aunque las fuentes coherentes presentan ciertas limitaciones, como el moteado, para los objetivos de este estudio, el láser fue la elección más adecuada, ya que sus propiedades ópticas permiten capturar con precisión los cambios de fase inducidos por el fenómeno estudiado.

Si bien las fuentes de baja coherencia y luz blanca no fueron empleadas, su capacidad para adaptarse a aplicaciones específicas subraya la diversidad de enfoques disponibles en holografía, destacando alternativas viables para investigaciones futuras.

### 2.1.2. Interferencia y Difracción

La holografía se fundamenta en dos fenómenos ópticos esenciales: *interferencia* y *difracción*. Estos fenómenos son indispensables tanto para la captura como para la reconstrucción de hologramas, ya que permiten registrar y proyectar la información tridimensional contenida en un frente de onda. La interferencia registra la información de fase y amplitud de la luz esparcida por un objeto rugoso o no especular, es decir, un objeto que, al ser iluminado por luz coherente, dispersa la luz en todas direcciones. Este esparcimiento genera, entre otros fenómenos, el moteado (*speckle*). Por otro lado, la difracción permite que la información registrada en la imagen bidimensional se reconstruya en forma de una representación tridimensional del objeto, preservando sus características originales.

## Interferencia

A la superposición de dos o más ondas se le conoce como interferencia, un fenómeno que genera un patrón resultante que depende de cómo se alinean las fases de las ondas al encontrarse. Este patrón puede mostrar zonas de mayor o menor intensidad, dependiendo de si las ondas se combinan de manera constructiva (reforzando la intensidad) o destructiva (reduciendo la intensidad) [19]. En el proceso holográfico, la interferencia es esencial, ya que permite capturar y registrar tanto la fase como la amplitud del frente de onda reflejado por un objeto. Sin este fenómeno, no sería posible obtener un holograma, pues el patrón de interferencia es el que contiene la información tridimensional necesaria para la reconstrucción de la imagen.

Matemáticamente, si consideramos dos ondas monocromáticas de la misma frecuencia, denotadas como  $E_1(r)$  y  $E_2(r)$ , la intensidad resultante  $I(r)$  en un punto  $r$  es la suma de las intensidades individuales de ambas ondas, junto con un término adicional que surge debido a su interferencia. La intensidad resultante se expresa como:

$$I(r) = |E_1(r) + E_2(r)|^2 = |E_1(r)|^2 + |E_2(r)|^2 + 2\text{Re}[E_1(r)E_2(r)] \quad (2.1)$$

donde  $|E_1(r)|^2$  y  $|E_2(r)|^2$  representan las intensidades individuales de las ondas  $E_1$  y  $E_2$  en el punto  $r$ . El último término de la expresión 2.1,  $2\text{Re}[E_1(r)E_2(r)]$ , es conocido como el término de interferencia.

El término de interferencia es especialmente importante porque refleja cómo se combinan las fases de las dos ondas en ese punto. Si las ondas están en fase (es decir, sus picos y valles coinciden), el término de interferencia refuerza la intensidad resultante, creando una interferencia constructiva. Si están fuera de fase (es decir, los picos de una coinciden con los valles de la otra), el término de interferencia reduce la intensidad resultante, generando una interferencia destructiva. Estas variaciones en la intensidad debidas a la interferencia son lo que conocemos como franjas de interferencia [19].

Al hacer la captura de hologramas, se trabaja con dos ondas específicas: el haz de referencia  $E_r(r)$  y el haz objeto  $E_o(r)$ . Ambos haces interfieren en el plano del medio de registro (el material o sensor en el que se captura el holograma), y el patrón de interferencia resultante, que es el holograma, contiene toda la información sobre la amplitud y la fase del haz objeto. Esta información es lo que permite la reconstrucción tridimensional de la imagen del objeto en holografía [11].

## Difracción

La difracción es el fenómeno óptico que describe cómo las ondas de luz se modifican al pasar por una apertura o al encontrarse con un obstáculo. Entender que es la difracción es muy importante para poder llevar a cabo el proceso de reconstrucción de los hologramas, ya que permite que el patrón de interferencia registrado actúe como una “ventana” que redirige el frente de onda original del objeto, recreando así su imagen tridimensional.

La teoría escalar de la difracción es una aproximación utilizada para describir el fenómeno de la difracción, que simplifica las ecuaciones de onda al tratar la luz como una onda escalar en lugar de un campo electromagnético vectorial. Esta teoría es válida bajo ciertas condiciones, como la linealidad, isotropía, homogeneidad y ausencia de dispersión o propiedades magnéticas en el medio de propagación. Además, resulta adecuada cuando las dimensiones de las aperturas son comparables a las longitudes de onda de la luz, una situación que se encuentra frecuentemente en aplicaciones holográficas [11].

El punto de partida es el principio de Huygens-Fresnel, que establece que cada punto difractado de un frente de onda actúa como una fuente secundaria de ondas esféricas [19]. La propagación de un campo óptico  $U(\mathbf{r})$  desde una superficie  $S$  a un punto de observación  $P$  se describe mediante la integral de Kirchhoff-Fresnel:

$$U(P) = \frac{1}{i\lambda} \iint_S U(Q) \frac{e^{ik|P-Q|}}{|P-Q|} (\cos \theta) dS \quad (2.2)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la luz,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  corresponde al número de onda,  $Q$  es un punto sobre la superficie  $S$ ,  $|P-Q|$  es la distancia entre el punto de observación  $P$  y el punto  $Q$  en la superficie, y  $\theta$  es el ángulo entre la dirección de  $\mathbf{P} - \mathbf{Q}$  y la normal a la superficie en  $Q$ .

Para poder resolver la integral 2.2, existen dos aproximaciones principales según la distancia entre el punto de observación y el obstáculo o apertura: el campo cercano y el campo lejano. En el campo cercano, también conocido como difracción de Fresnel, la distancia entre la apertura y el plano de observación es relativamente corta, típicamente en el rango de milímetros a decenas de centímetros, dependiendo de las dimensiones de la apertura y la longitud de onda de la luz utilizada. En esta aproximación, las ondas difractadas presentan curvaturas significativas, y se necesita un tratamiento más detallado de las variaciones en el frente de onda para describir la propagación de la luz. Bajo esta aproximación, la expresión del campo difractado

se simplifica, permitiendo calcular el patrón de difracción de manera más manejable [11].

El campo en el plano de observación a una distancia  $z$  puede expresarse como:

$$U(x, y) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} \iint_{-\infty}^{\infty} U(\xi, \eta) e^{i\frac{k}{2z}[(x-\xi)^2+(y-\eta)^2]} d\xi d\eta \quad (2.3)$$

donde  $U(\xi, \eta, 0)$  es el campo en el plano  $z = 0$ .

Por otro lado, en el campo lejano, o difracción de Fraunhofer, la distancia entre la apertura y el plano de observación es considerablemente grande, típicamente cuando esta distancia supera varias veces el cuadrado del tamaño característico de la apertura dividido por la longitud de onda de la luz ( $z \gg a^2/\lambda$ ). En esta aproximación, las ondas difractadas pueden considerarse prácticamente planas, lo que simplifica el análisis de la propagación de la luz.

$$U(f_x, f_y) = \frac{e^{ikz} e^{i\frac{k}{2z}(x^2+y^2)}}{i\lambda z} \iint_{-\infty}^{\infty} U(\xi, \eta) e^{-i2\pi(f_x\xi+f_y\eta)} d\xi d\eta \quad (2.4)$$

donde  $f_x = \frac{x}{\lambda z}$  y  $f_y = \frac{y}{\lambda z}$  son las frecuencias espaciales. En esta situación, las ondas difractadas son prácticamente planas, lo que simplifica las ecuaciones y permite tratar la propagación de la luz solo resolviendo la transformada de Fourier, facilitando la reconstrucción de la imagen del objeto.

Entender estas aproximaciones ayuda a determinar cómo el frente de onda interactúa con el medio de registro y cómo se proyecta la imagen en el plano de observación. Estos modelos de difracción permiten capturar y reconstruir la información de fase y amplitud, elementos necesarios para obtener hologramas de buena calidad.

## 2.2. Interferometría Holográfica Digital para el Análisis de Cambios de Fase

La holografía digital ha transformado el registro y procesamiento de hologramas mediante sensores electrónicos avanzados y algoritmos computacionales. Este enfoque permite capturar hologramas en tiempo real y analizar cambios de fase inducidos por variaciones en el índice de refracción del medio. Estas capacidades hacen que la holografía digital sea una herramienta poderosa para caracterizar de manera no

invasiva fenómenos dinámicos en medios líquidos y sólidos, como gradientes térmicos o deformaciones inducidas por estímulos ópticos y mecánicos [23, 24].

### 2.2.1. Método de Doble Exposición

El método de doble exposición es una técnica recurrente en holografía para evaluar cambios de fase. Este procedimiento implica registrar un holograma en el estado inicial del sistema, cuando no se ha aplicado perturbación alguna, y otro tras inducir el fenómeno a estudiar. Al reconstruir ambos hologramas y calcular la diferencia entre sus fases, se genera un mapa diferencial que refleja las variaciones provocadas en el medio [25].

En holografía digital, el método de doble exposición se ha fortalecido gracias a los avances en algoritmos computacionales, como el método del espectro angular y las técnicas basadas en la transformada de Fourier. Estos algoritmos permiten recuperar la información de fase con precisión, reducir el ruido y mejorar la resolución espacial [22, 20]. Esto resulta esencial para interpretar correctamente los datos diferenciales, especialmente en situaciones donde los cambios de fase son muy pequeños y pueden ser afectados por interferencias externas.

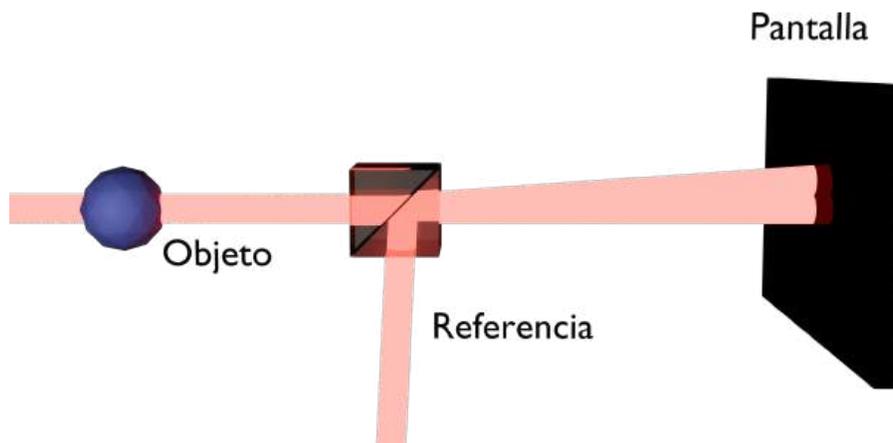
Este enfoque es especialmente útil en aplicaciones que involucran medios líquidos transparentes, como el estudio del fenómeno de lente térmica. Al registrar hologramas antes y después de la excitación láser, es posible identificar gradientes térmicos inducidos en el medio con gran detalle.

Existen algoritmos modernos que aplican el método de doble exposición para optimizar la obtención de datos de fase, mejorando la precisión al abordar distintas formas de realizar la resta de fase e incorporando técnicas para el desenvolvimiento de la misma [25]. Estos enfoques permiten superar desafíos experimentales, como el ruido y las interferencias externas, proporcionando reconstrucciones más exactas y detalladas.

En este proyecto, no se implementaron estas técnicas avanzadas, lo cual podría explicar las limitaciones en la precisión de las mediciones obtenidas. Sin embargo, su inclusión en trabajos futuros podría mejorar significativamente la capacidad de análisis, especialmente en condiciones experimentales más exigentes.

### 2.2.2. Configuración Off-Axis en Holografía Digital

La configuración *off-axis* en holografía digital permite registrar hologramas con una separación espacial efectiva entre los términos de interferencia, lo que facilita extraer la información de fase y amplitud. En este diseño, el haz de referencia y el haz objeto inciden sobre el detector con un ángulo relativo, como se ilustra en la Figura 2.1. Esta disposición garantiza que las componentes del frente de onda se registren de forma desplazada en el plano del detector, evitando superposiciones indeseadas, principalmente mediante la separación de los órdenes difractados en el espacio de Fourier y facilitando el procesamiento digital.



**Figure 2.1:** Diagrama de la configuración holográfica fuera de eje en transmisión. El haz objeto atraviesa el medio bajo estudio, mientras que el haz de referencia incide en el detector con un ángulo relativo, generando un patrón de interferencia en el plano del detector. Esta disposición asegura una captura clara de la información de fase y amplitud, separada espacialmente, para facilitar su reconstrucción digital.

En el caso específico de la configuración *off-axis* por transmisión, el haz objeto atraviesa directamente el medio bajo estudio, registrando las variaciones en la fase del frente de onda inducidas por cambios en el índice de refracción. Estas variaciones están asociadas a alteraciones en la estructura o densidad del medio, como las generadas por gradientes térmicos en líquidos. El patrón de interferencia resultante captura esta información en forma de franjas de intensidad moduladas espacialmente, que codifican las características tridimensionales del medio.

El ángulo entre los haces genera un patrón de interferencia con componentes espaciales bien definidas, como se observa en la Figura 2.2, que muestra la

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

transformada de Fourier del holograma. En el dominio de frecuencias, estas componentes están separadas, lo que permite aplicar técnicas de filtrado para aislar la información de interés, como la fase cruzada. Esta separación facilita una reconstrucción precisa del holograma y la extracción de información relevante, como las variaciones del índice de refracción en el medio.

Esta configuración es particularmente adecuada para capturar pequeñas variaciones de fase, que son indicativas de cambios en las propiedades ópticas del medio. En este trabajo, se utilizó esta técnica para analizar las alteraciones inducidas por el fenómeno de lente térmica en medios líquidos. Las variaciones de fase registradas proporcionan un mapa detallado de cómo el medio responde a estímulos externos, permitiendo un análisis cuantitativo directo de los cambios térmicos y ópticos.



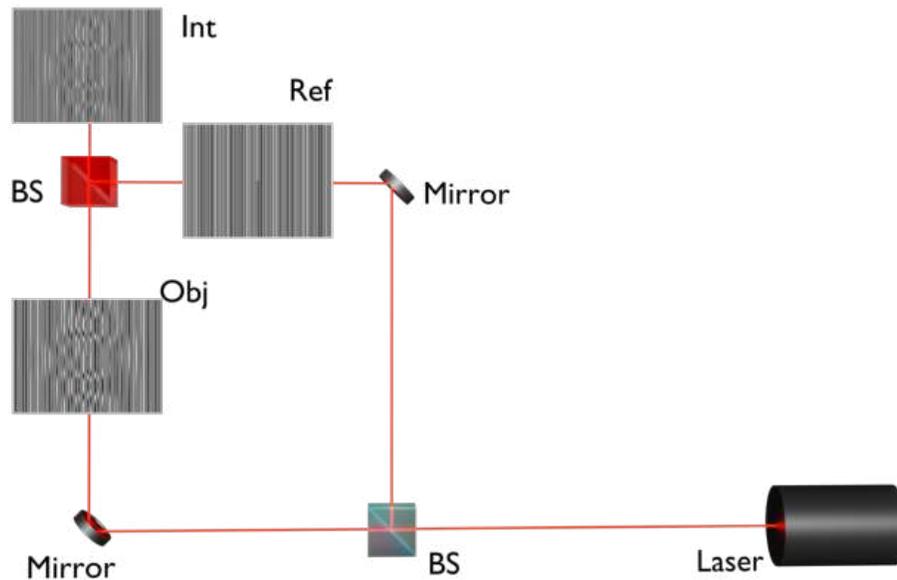
**Figure 2.2:** Transformada de Fourier de un holograma capturado utilizando la configuración holográfica fuera de eje en transmisión. La imagen muestra la separación espacial de las frecuencias generadas por la interferencia, lo que permite aislar con precisión las componentes de fase y amplitud necesarias para la reconstrucción digital.

### 2.2.3. Interferómetro de Mach-Zehnder en Holografía Digital

Para implementar la configuración *off-axis*, se utilizó un interferómetro de Mach-Zehnder, que permite dividir un haz de luz en dos caminos ópticos separados

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

y luego recombinarlos para generar patrones de interferencia. Esta configuración es ideal para holografía digital, ya que proporciona flexibilidad para ajustar los ángulos y trayectorias de los haces objeto y referencia.



**Figure 2.3:** Configuración experimental del interferómetro de Mach-Zehnder adaptado para holografía digital. El haz objeto atraviesa el medio bajo estudio, mientras que el haz de referencia sigue un camino óptico sin perturbaciones.

En esta configuración, el haz objeto atraviesa directamente el medio líquido en estudio, registrando las variaciones de fase inducidas por el fenómeno de lente térmica. El haz de referencia sigue un camino óptico independiente, permaneciendo inalterado. Ambos haces se recombinan en el detector digital, generando un patrón de interferencia que contiene información detallada sobre las variaciones de fase del medio.

El uso del interferómetro de Mach-Zehnder garantiza que los hologramas capturados reflejen con precisión los pequeños cambios de fase provocados por gradientes térmicos. Además, su flexibilidad permite implementar configuraciones experimentales robustas, optimizadas para minimizar los efectos de vibraciones y fluctuaciones ambientales.

En este estudio, se emplearon el método de doble exposición, la configuración *off-axis* y el interferómetro de Mach-Zehnder como herramientas para el registro y análisis de cambios de fase inducidos por el fenómeno de lente térmica. La elección de estas técnicas responde a sus ventajas ya mencionadas, como la capacidad de

separar espacialmente los términos de interferencia y permitir el cálculo diferencial de fase con mayor precisión.

Además, el uso de algoritmos como el método del espectro angular, ampliamente reconocido en la reconstrucción de hologramas digitales, ofrece beneficios importantes, incluyendo la reducción del ruido y una mejor resolución en la extracción de la información de fase. Estos métodos facilitan un análisis más detallado de los fenómenos estudiados, ampliando las posibilidades de caracterización en aplicaciones futuras.

## 2.3. Captura y Reconstrucción de Hologramas Digitales

Teniendo claro el sistema de captura de hologramas, es fundamental comprender cómo se lleva a cabo el proceso de grabado y reconstrucción, ya que este es el puente entre el fenómeno físico a estudiar y su interpretación. Este proceso no solo permite registrar la información tridimensional codificada en un formato bidimensional, sino que también hace posible su análisis mediante algoritmos computacionales.

### 2.3.1. Proceso de Captura

En la configuración *off-axis*, el detector registra la interferencia entre el haz objeto,  $E_o(x, y)$ , y el haz de referencia,  $E_r(x, y)$ . El patrón resultante se almacena como una distribución de intensidad en el plano del detector, descrita por:

$$I(x, y) = |E_o(x, y) + E_r(x, y)|^2 \quad (2.5)$$

Esta expresión se descompone en varios términos:

$$I(x, y) = |E_o(x, y)|^2 + |E_r(x, y)|^2 + E_o(x, y)E_r^*(x, y) + E_o^*(x, y)E_r(x, y). \quad (2.6)$$

Los términos  $E_o(x, y)E_r^*(x, y)$  y  $E_o^*(x, y)E_r(x, y)$  contienen la información cruzada entre el haz objeto y el haz de referencia, que codifica la amplitud y fase relativas del frente de onda del haz objeto.

En holografía digital, estos términos permiten la recuperación de la información del frente de onda durante la reconstrucción numérica.

### 2.3.2. Algoritmos de Reconstrucción

Para extraer la información de fase a partir de los hologramas capturados, es necesario realizar la reconstrucción del frente de onda. Este proceso permite obtener el holograma reconstruido y, a partir de él, extraer la información de interés, como las variaciones de fase y amplitud del haz objeto. Para llevar a cabo esta tarea, se han desarrollado diversos algoritmos computacionales, entre los cuales destacan el método de convolución de Huygens, el método de Fresnel y el método de espectro angular [26]. Cada uno de estos métodos presenta ventajas y desventajas, que deben ser consideradas dependiendo de las características del sistema y de los objetivos del análisis.

Cada uno tiene sus particularidades pero en esencia el proceso general para la reconstrucción incluye los siguientes pasos:

1. **Transformada de Fourier:** Inicialmente, se aplica la transformada de Fourier bidimensional al holograma capturado. Esto permite pasar al dominio de frecuencias espaciales, donde los términos cruzados que contienen la información del frente de onda se separan de los términos de intensidad de fondo y otros componentes no deseados.
2. **Filtro Pasa-Banda:** En el dominio de frecuencias, se emplea un filtro pasa-banda para aislar el término cruzado ( $E_o(x, y)E_r^*(x, y)$ ) que codifica la amplitud y fase del frente de onda del haz objeto. El aplicar el filtro ayuda a eliminar el ruido y otras contribuciones indeseadas que podrían afectar la calidad de la reconstrucción.
3. **Aplicación del Kernel de reconstrucción:** El término cruzado aislado se propaga desde el plano del detector al plano de reconstrucción mediante una función de propagación (*Point Spread Function, PSF*, por sus siglas en inglés). La elección de la PSF depende del método utilizado:
  - En el método de convolución de Huygens, se utiliza la PSF basada en la integral de Kirchhoff-Fresnel.
  - En el método de Fresnel, se aplica una PSF aproximada que es válida para distancias de propagación medianas o largas.
  - En el método del espectro angular, la propagación se realiza directamente en el dominio de frecuencias espaciales, utilizando una PSF que considera la descomposición en ondas planas.

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

4. **Transformada Inversa:** Finalmente, se aplica la transformada de Fourier inversa para regresar al dominio espacial y obtener el campo complejo reconstruido  $E'(x, y; z)$ . Este campo contiene tanto la amplitud como la fase del haz objeto, que pueden ser analizadas para extraer información cuantitativa sobre el fenómeno estudiado.

En las siguientes secciones se profundizará un poco más en cada uno de los algoritmos.

### Convolución de Huygens

El método de convolución de Huygens se fundamenta en la teoría de Huygens-Fresnel, la cual describe que cada punto de un frente de onda actúa como una fuente secundaria que genera ondas esféricas [12]. En este método, la reconstrucción del frente de onda se realiza mediante la convolución de la transformada de Fourier filtrada del holograma  $H_f(x, y)$  con una PSF, definida como:

$$E(x, y; z) = H_f(x, y) * S_H(x, y; z),$$

donde la función de propagación está dada por:

$$S_H(x, y; z) = -\frac{ik}{2\pi z} \exp \left[ ik \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right].$$

En esta expresión,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  es el número de onda,  $(x, y)$  son las coordenadas espaciales en el plano de reconstrucción, y  $z$  es la distancia de propagación. Este enfoque considera la curvatura completa del frente de onda y proporciona una descripción exacta de los efectos de propagación, como la difracción y la curvatura del frente de onda, lo que lo convierte en un método altamente preciso.

Una de las características más notables de este método es su capacidad para reconstruir hologramas a cualquier distancia de propagación  $z$ , sin restricciones relacionadas con aproximaciones geométricas o límites de distancia. Esto lo hace ideal para aplicaciones en las que la precisión es prioritaria o se utilizan configuraciones con geometrías complejas, donde métodos más simplificados, como el de Fresnel, podrían introducir errores significativos.

Sin embargo, esta alta precisión tiene un costo computacional considerable. El cálculo de la PSF para cada píxel del holograma, combinado con la convolución espacial requerida, resulta en un procesamiento computacional intensivo que

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

demanda tanto tiempo como recursos. Esto representa una limitación importante cuando se trabaja con grandes volúmenes de datos, como es el caso del experimento desarrollado, donde se capturan y procesan numerosos hologramas.

En el contexto de este trabajo, aunque el método de convolución de Huygens ofrece una reconstrucción precisa del frente de onda, su elevado costo computacional y tiempo de procesamiento lo hacen menos práctico para el análisis de los datos obtenidos, en comparación con los otros métodos propuestos.

### Aproximación de Fresnel

El método de reconstrucción basado en la aproximación de Fresnel parte de una versión simplificada de la teoría de propagación óptica, en la cual se asume que las distancias de propagación  $z$  son suficientemente grandes para que los términos de mayor orden en la curvatura del frente de onda puedan ser despreciados[11]. La PSF para esta aproximación está dada por:

$$S_F(x, y; z) = -\frac{ik}{2\pi z} \exp \left[ i \frac{k}{2z} (x^2 + y^2) \right].$$

Esta simplificación reduce significativamente el costo computacional en comparación con la convolución de Huygens, ya que elimina la necesidad de calcular la curvatura completa del frente de onda. En su lugar, se utiliza una representación parabólica que describe adecuadamente los efectos de difracción para distancias moderadas a largas.

La reconstrucción del frente de onda utilizando esta aproximación se realiza aplicando la transformada de Fourier, según la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} E(x, y; z) &= \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F}\{h(x, y)\} \exp \left[ i \frac{k}{2z} (f_x^2 + f_y^2) \right] \right\} \\ &= \mathcal{F}^{-1} \left\{ H_f(f_x, f_y) \exp \left[ i \frac{k}{2z} (f_x^2 + f_y^2) \right] \right\}. \end{aligned}$$

Aquí,  $(f_x, f_y)$  son las frecuencias espaciales correspondientes y  $H_f(f_x, f_y)$  corresponde a la transformada de Fourier filtrada del holograma. Este enfoque permite realizar la reconstrucción en el dominio de frecuencias, lo que lo hace computacionalmente más eficiente y adecuado para aplicaciones que requieren tiempos de procesamiento más cortos. Esto lo hace especialmente útil en situaciones donde se capturan grandes volúmenes de datos y la velocidad de procesamiento

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

es prioritaria. Sin embargo, esta aproximación presenta limitaciones importantes en distancias de propagación cortas. Al depender directamente de la distancia de reconstrucción  $z$ , la precisión del método disminuye a medida que esta distancia se reduce, lo que puede reducir la calidad de la reconstrucción del frente de onda.

En el contexto del experimento desarrollado, el uso de lentes con distancias focales cortas introduce variaciones significativas en la curvatura del frente de onda, lo que limita la precisión del método en distancias de reconstrucción reducidas. Aunque este enfoque puede ser efectivo en ciertas aplicaciones, su desempeño se ve comprometido en escenarios donde se requiere capturar detalles finos a distancias cortas. Esta limitación resalta la necesidad de métodos más robustos, como el del espectro angular, que ofrece una mayor versatilidad y precisión para este tipo de condiciones, como se discutirá en la próxima sección.

### Método del Espectro Angular

El método del espectro angular se basa en la representación del frente de onda como una suma de componentes espaciales, conocidas como espectros angulares. Este enfoque permite modelar la propagación del frente de onda a cualquier distancia  $z$  con alta precisión, sin restricciones significativas en las condiciones de propagación. La PSF en este caso se define en el dominio de frecuencias espaciales como:

$$S_A(k_x, k_y; z) = \exp \left[ iz \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} \right],$$

donde  $k_x$  y  $k_y$  son las componentes de las frecuencias espaciales en las direcciones  $x$  y  $y$ , respectivamente, y  $k$  es el número de onda asociado a la longitud de onda de la luz utilizada.

La reconstrucción del frente de onda mediante este método implica aplicar la transformada de Fourier al holograma  $h(x, y)$  y posteriormente filtrarlo  $H_f(k_x, k_y)$  para obtener su representación en el dominio de frecuencias espaciales. Posteriormente, se multiplica por la PSF  $S_A(k_x, k_y; z)$ , que describe la propagación del frente de onda a una distancia  $z$ , y finalmente se realiza la transformada de Fourier inversa para obtener el campo reconstruido:

$$E(x, y; z) = \mathcal{F}^{-1} \{ \{ H_f(k_x, k_y) \} S_A(k_x, k_y; z) \}.$$

Este método fue elegido para el desarrollo de este trabajo debido a sus ventajas significativas, particularmente en escenarios donde se requiere trabajar con distancias

de reconstrucción cortas. A diferencia de la aproximación de Fresnel, el método del espectro angular no depende de aproximaciones parabólicas, lo que le permite mantener una alta precisión en cualquier rango de distancias. Esto lo hace ideal para el experimento desarrollado.

Además de su alta precisión, el método del espectro angular ofrece ventajas significativas, como su capacidad para procesar de manera eficaz las componentes de alta frecuencia presentes en el holograma. Esto se traduce en una mejora en la resolución espacial y de la calidad general de la reconstrucción. Estas características resultan particularmente valiosas en el análisis de hologramas digitales, donde los cambios de fase registrados suelen ser muy sutiles y exigen una interpretación precisa. En este trabajo, estas propiedades fueron esenciales para garantizar una reconstrucción confiable y detallada de las variaciones de fase inducidas en el medio en estudio.

En el contexto de este experimento, donde se analizan cambios de fase inducidos por el fenómeno de lente térmica en medios líquidos, el método del espectro angular permitió obtener reconstrucciones de alta calidad. Esto fue fundamental para garantizar la fiabilidad de los resultados y para capturar de manera efectiva las pequeñas variaciones en el índice de refracción del medio en estudio.

## 2.4. Modelo teórico del cambio de fase inducido por lente térmica

El fenómeno de lente térmica puede modelarse considerando las ecuaciones de transferencia de calor y la relación entre los gradientes térmicos y los cambios en el índice de refracción del medio [27]. El cambio de fase inducido en un medio transparente se describe mediante la ecuación:

$$\phi(r, t) = \theta \int_0^t \frac{1 - \exp\left(-\frac{t'}{\tau}\right)}{1 + \frac{t'}{\tau} + \left(\frac{r}{w}\right)^2} dt', \quad (2.7)$$

donde  $\theta$  es un factor relacionado con las propiedades térmicas y ópticas del sistema, y  $\tau$  es la constante de tiempo térmica que gobierna la dinámica del proceso. La expresión muestra cómo parámetros como la potencia del láser ( $P$ ), el diámetro del haz ( $w$ ), y el coeficiente de absorción ( $\alpha$ ) determinan la magnitud y distribución espacial del cambio de fase.

La dinámica temporal está caracterizada por  $\tau$ , dada por:

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

$$\tau = \frac{w^2 \rho c}{4\kappa}, \quad (2.8)$$

donde  $\rho$ ,  $c$ , y  $\kappa$  son las propiedades térmicas del medio. En tiempos cortos ( $t \ll \tau$ ), el cambio de fase crece linealmente con el tiempo de excitación, mientras que en tiempos largos ( $t \gg \tau$ ), el sistema alcanza un estado estacionario, donde la fase depende principalmente de la potencia del láser y el radio del haz:

$$\phi_{\text{máx}}(r) = \frac{\alpha P l}{\kappa \lambda} \frac{dn}{dT} \frac{1}{1 + \left(\frac{r}{w}\right)^2}. \quad (2.9)$$

Aunque estas ecuaciones son útiles para describir el fenómeno, el objetivo de este trabajo no radica en un análisis detallado del modelo teórico ni en la obtención precisa de parámetros como  $\alpha$ , sino en el estudio de cómo el fenómeno de lente térmica genera cambios de fase extremadamente pequeños en líquidos transparentes y en evaluar la capacidad del sistema propuesto para registrar estos cambios de manera efectiva.

Registrar cambios de fase tan pequeños representa un reto significativo debido a variables externas como fluctuaciones ambientales y vibraciones indeseables, que dificultan la observación de efectos térmicos puros. Optimizar las condiciones experimentales es esencial para minimizar estas interferencias y garantizar mediciones confiables.

La elección de la lente térmica como caso de estudio responde a la necesidad de validar el sistema holográfico frente a cambios de fase sutiles, que incluso pueden no envolver la fase. Esto es de suma importancia considerando los objetivos futuros del proyecto, como diferenciar este fenómeno de otros efectos ópticos, como la presión óptica, que también generan deformaciones en medios líquidos. Por tanto, este trabajo establece una base sólida para el desarrollo de herramientas que permitan analizar cambios de fase pequeños y complejos en medios transparentes.

# Capítulo 3

## Diseño experimental

Como proceso de validación del sistema holográfico digital en configuración Mach-Zehnder, se estudia el fenómeno de lente térmica en un medio transparente. Este sistema permite la captura de hologramas digitales para analizar los cambios de fase inducidos por el fenómeno de lente térmica. En este capítulo se detallan el arreglo experimental, los componentes empleados y el procedimiento seguido para llevar a cabo el estudio.

### 3.1. Montaje Experimental

Se implementó un arreglo experimental basado en un interferómetro de Mach-Zehnder adaptado para holografía digital en transmisión, como se muestra en la Figura 3.1. Este sistema utiliza un láser de 632 nm para la captura de hologramas. El haz láser se divide en dos caminos ópticos mediante un divisor de haz (*beam splitter*), identificado como  $BS_1$ : el haz objeto y el haz de referencia.

El haz objeto es dirigido hacia la muestra por el espejo  $M_1$ , atravesándola y modificando su frente de onda debido a las propiedades ópticas del medio. Por otro lado, el haz de referencia sigue un camino óptico separado guiado por  $M_2$  a través de  $BS_2$  y, al no interactuar con la muestra, permanece inalterado. Para garantizar un contraste adecuado en los hologramas capturados, se utiliza un filtro de densidad neutra con un valor de 0.6 en el camino del haz de referencia, optimizando el equilibrio de intensidades entre ambos haces y mejorando la calidad del contraste en los hologramas obtenidos.

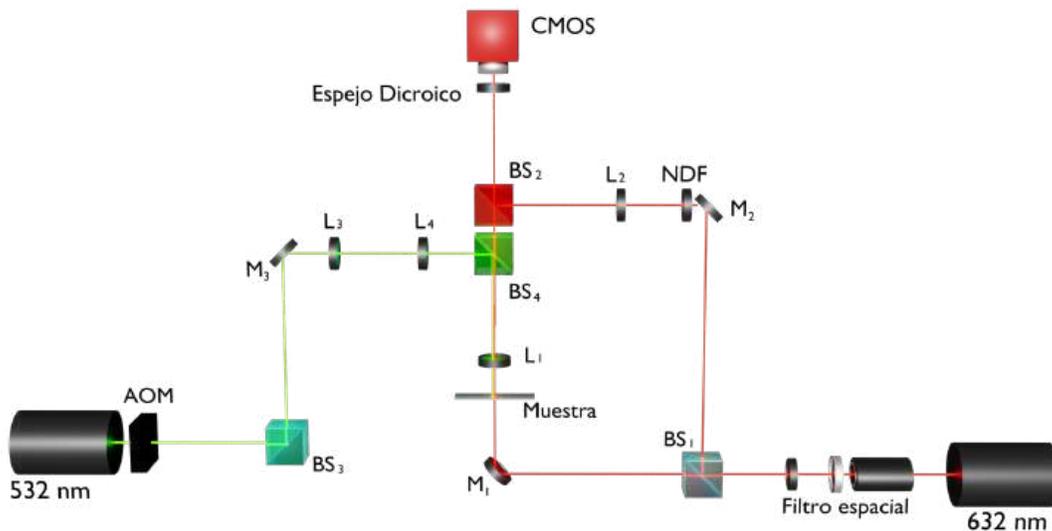
Con el objetivo de mejorar el campo de visión y asegurar la captura adecuada

### CAPÍTULO 3. EXPERIMENTO

tanto del pulso de perturbación como del haz objeto, se emplean dos lentes  $L_1$  y  $L_2$  de distancia focal de  $f = 25,4\text{mm}$  en los caminos ópticos del haz objeto y del haz de referencia, respectivamente. Los dos haces se recombinan al pasar por  $BS_2$ , generando un patrón de interferencia en el plano de la cámara, lo que permite la captura de los hologramas para su posterior análisis.

El montaje experimental fue diseñado originalmente para trabajar con tres longitudes de onda. Sin embargo, al ser adaptado para operar con una sola longitud de onda, no se optimizó completamente para esta configuración específica, esto por cuestión de tiempo. Como resultado, se incluyeron algunos componentes ópticos adicionales, como divisores de haz y espejos, que no eran esenciales para la implementación actual.

Adicionalmente, se utilizó un espejo dicroico colocado antes de la cámara para evitar que la luz del haz de excitación de  $532\text{ nm}$  alcance el detector, asegurando que la cámara solo registre la información proveniente del láser de iluminación de  $632\text{ nm}$ .



**Figure 3.1:** Esquema del montaje experimental del arreglo holográfico digital basado en un interferómetro de Mach-Zehnder adaptado para holografía digital en transmisión. Los divisores de haz  $BS_1$  y  $BS_2$  forman parte del Mach-Zehnder, mientras que  $BS_3$  y  $BS_4$  se emplean para dirigir el haz de excitación hacia la muestra.

Para inducir el fenómeno de lente térmica, se utiliza un láser continuo Verdi

### CAPÍTULO 3. EXPERIMENTO

V10 de 532 nm, utilizando una potencia de salida del haz de excitación de 4 W. Este haz de excitación es modulado temporalmente mediante un modulador acusto-óptico (*Acousto-Optic Modulator*, *AOM*, por sus siglas en inglés) y un retardador de pulsos, lo que permite un control preciso de los tiempos de exposición del láser sobre la muestra. Para garantizar que la energía bombeada al medio sea suficiente para observar el fenómeno de lente térmica, se emplean dos lentes adicionales:  $L_3$  con  $f = 200$  mm y  $L_4$  con  $f = 20,4$  mm. Esta configuración permite reducir el diámetro original del haz del láser Verdi V10, incrementando significativamente la densidad de energía sobre la muestra. Además, el haz pasa posteriormente por la lente  $L_1$  con  $f = 25,4$  mm lo que reduce aún más el radio del haz, permitiendo un mejor enfoque sobre la muestra.

$BS_3$ ,  $M_3$  y  $BS_4$  se utilizan para dirigir el haz de excitación hacia la muestra de manera eficiente, garantizando una distribución homogénea de energía sobre el área irradiada. La muestra seleccionada para el estudio fue alcohol etílico al 95 %, un medio conocido por su alta capacidad de absorción térmica. Esta elección facilita la observación efectiva del fenómeno y permite la comparación con estudios previos que investigaron lentes térmicas en líquidos similares [16].

La cámara utilizada para capturar los hologramas fue la Mako U-503 de Allied Vision. Inicialmente, se trabajó con la resolución completa de la cámara (2592 (H)  $\times$  1944 (V)); sin embargo, esta configuración limitaba la velocidad de captura a 14 **fps** (*frames per second*, cuadros por segundo), dificultando el análisis detallado de las dinámicas inducidas. Por este motivo, se optó por reducir la resolución a 700 (H)  $\times$  1300 (V), alcanzando una velocidad de captura de 60 fps, lo que equilibró adecuadamente la resolución espacial y temporal, cumpliendo con los requisitos experimentales.

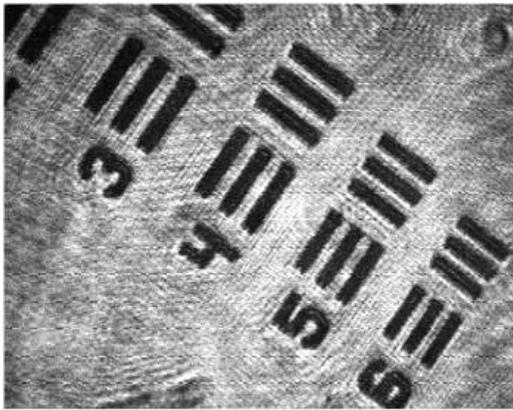
Para registrar el límite de resolución del sistema de captura, se utilizó un *1951 USAF Resolution Test Target*, logrando enfocar hasta el grupo 4, línea 6, como se muestra en la Figura 3.2. Según el fabricante, esta configuración corresponde a una resolución de 90.5 líneas por milímetro (lp/mm).

Durante el experimento, el láser de excitación se aplicó durante 10 segundos para inducir la perturbación térmica en la muestra. Posteriormente, se permitió un tiempo de relajación de 5 segundos antes de iniciar la captura de hologramas, garantizando la observación del fenómeno desde su inducción hasta la estabilización. Se adquirieron 500 hologramas a una velocidad de 50 fps, proporcionando una resolución temporal adecuada para analizar las dinámicas inducidas.

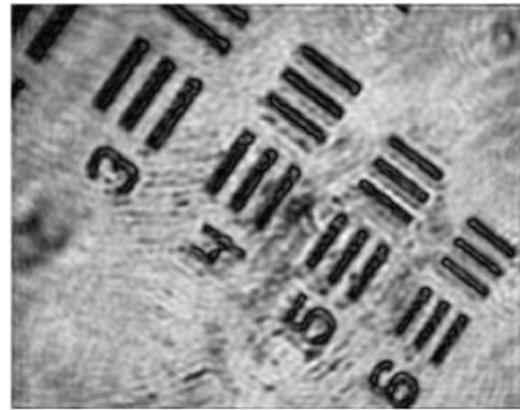
El método de espectro angular fue utilizado para la reconstrucción de los hologramas, permitiendo obtener mapas de fase que reflejan las deformaciones

### CAPÍTULO 3. EXPERIMENTO

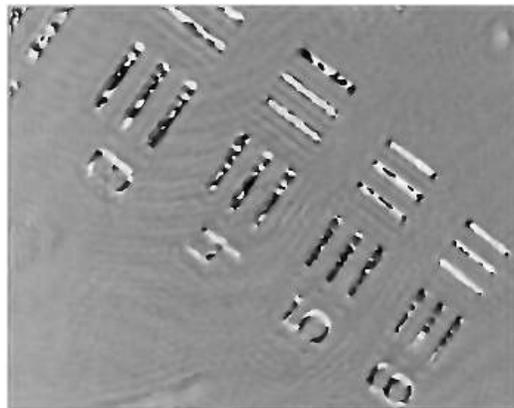
inducidas por el fenómeno de lente térmica. Esta técnica fue seleccionada por su precisión y eficiencia en distancias de reconstrucción cortas, asegurando un análisis confiable del sistema experimental.



(a)



(b)



(c)

**Figure 3.2:** Análisis comparativo de un holograma capturado y su procesamiento. En la imagen 3.2a se observa el holograma capturado directamente del sistema experimental; en 3.2b, el holograma reconstruido utilizando el método de espectro angular; y en 3.2c, el mapa de fase derivado del holograma reconstruido.

# Capítulo 4

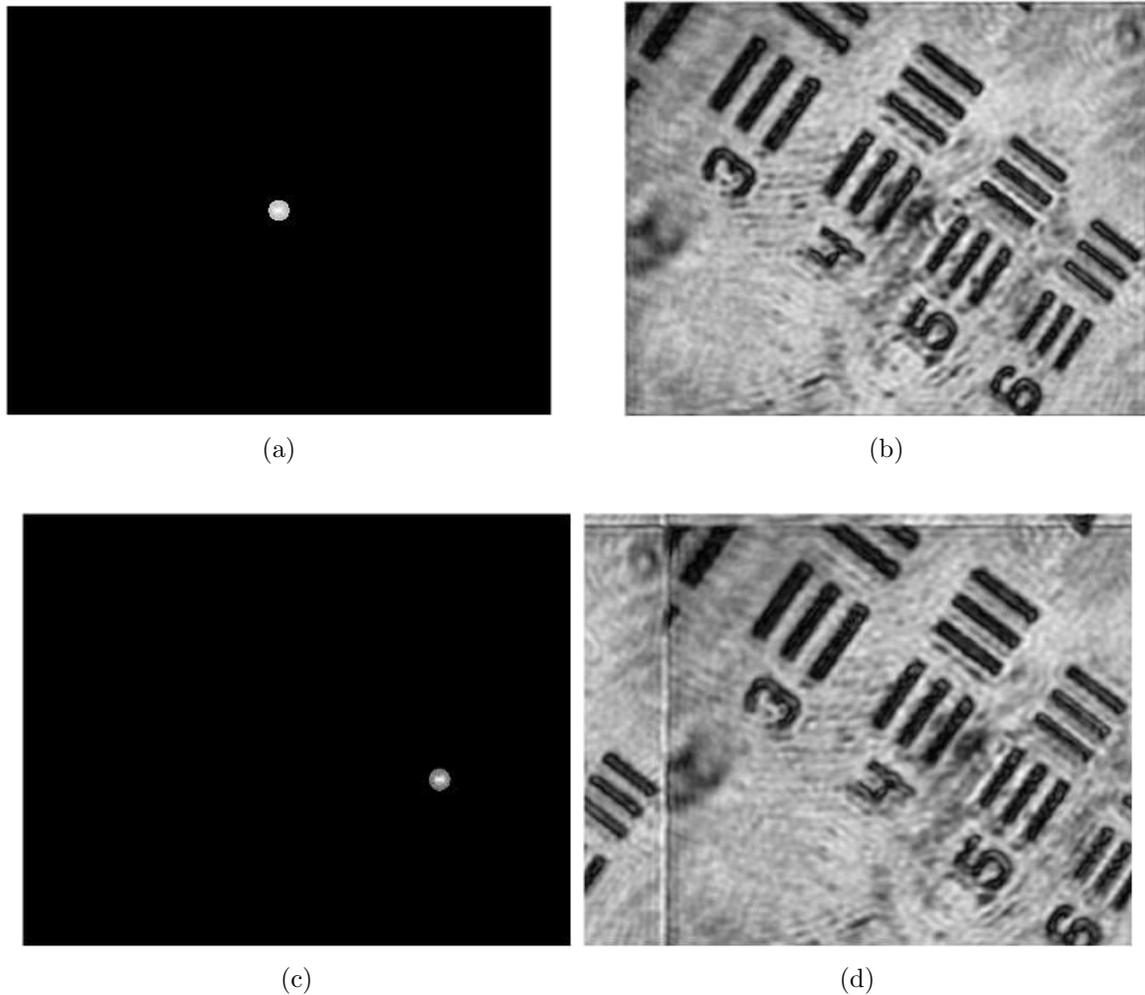
## Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de los hologramas digitales capturados en el montaje experimental descrito. El análisis se enfocó en observar las variaciones de fase inducidas por el fenómeno de lente térmica y evaluar la capacidad del arreglo experimental para registrar y cuantificar estos cambios.

Los resultados se organizan en cuatro apartados principales: primero, se analizan las características de los hologramas capturados, incluyendo la comparación entre el holograma de referencia y el holograma perturbado; en segundo lugar, se estudian los cambios de fase a partir de los datos experimentales disponibles; en tercer lugar, se identifican las limitaciones del sistema experimental y los desafíos técnicos que afectan la sensibilidad de las mediciones; y, finalmente, se proponen mejoras para optimizar tanto el sistema como el procesamiento de datos, destacando las perspectivas de trabajo futuro.

### 4.1. Hologramas y procesamiento

Para garantizar que el proceso de captura de hologramas fuera adecuado y que las reconstrucciones ofrecieran la calidad necesaria para el análisis de cambios de fase, se llevaron a cabo múltiples pruebas, incluyendo la evaluación del programa de reconstrucción basado en el método de espectro angular, como se describió en el capítulo 3. Este método fue seleccionado debido a su menor costo computacional en comparación con otros enfoques, como la convolución de Huygens o la aproximación de Fresnel, y por su capacidad para trabajar con una amplia gama de distancias de reconstrucción sin restricciones significativas. Estas características facilitaron el análisis de los hologramas capturados en condiciones experimentales variadas.



**Figure 4.1:** Efecto del filtraje y centrado en el dominio de Fourier sobre la calidad de las reconstrucciones holográficas. La subfigura 4.1a muestra el espectro de Fourier filtrado utilizando una máscara circular centrada, mientras que 4.1b presenta la reconstrucción obtenida, evidenciando una imagen centrada y bien definida. En contraste, la subfigura 4.1c ilustra el espectro filtrado sin centrar el lóbulo, lo que genera la reconstrucción mostrada en 4.1d, donde la imagen aparece desplazada y truncada. Estos resultados resaltan la relevancia del centrado adecuado para optimizar el procesamiento y la calidad de las reconstrucciones.

Para evaluar el desempeño del sistema, se utilizó un *USAF 1951 Resolution Test Target*, cuyo holograma fue capturado, reconstruido y analizado en términos de fase. Este ensayo inicial validó la capacidad del sistema para procesar imágenes de referencia y proporcionó una base para analizar deformaciones inducidas en la muestra. Se probaron diferentes tiempos de exposición y técnicas de filtraje en el dominio de Fourier, utilizando máscaras circulares para aislar uno de los lóbulos

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

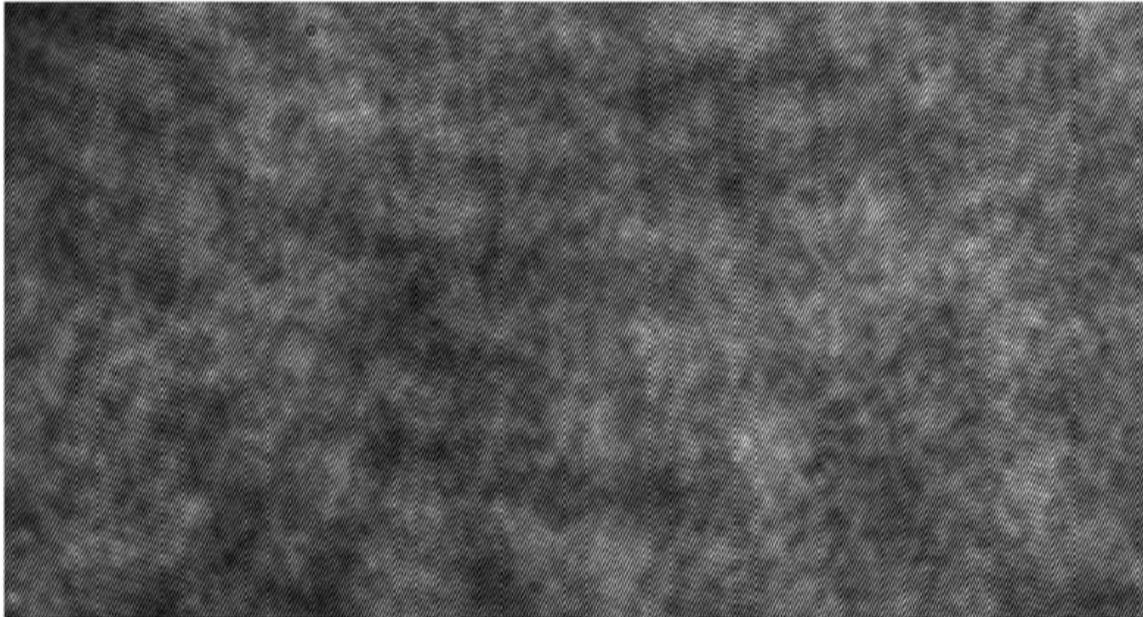
del espectro. Se observó que centrar el lóbulo filtrado mejora significativamente la reconstrucción al eliminar artefactos como el término DC y la imagen conjugada.

En la Figura 4.1, se ilustra el impacto del filtraje y centrado en el dominio de Fourier sobre las reconstrucciones holográficas. La subfigura 4.1a muestra el espectro de Fourier filtrado con una máscara circular centrada, lo que permite aislar el término relevante para la reconstrucción. En 4.1b, la reconstrucción resultante presenta una imagen bien definida y centrada. Por otro lado, 4.1c ilustra el espectro filtrado sin centrar, generando una reconstrucción desplazada y truncada como se observa en 4.1d. Esto resalta la importancia de centrar el lóbulo filtrado para garantizar una reconstrucción de calidad.

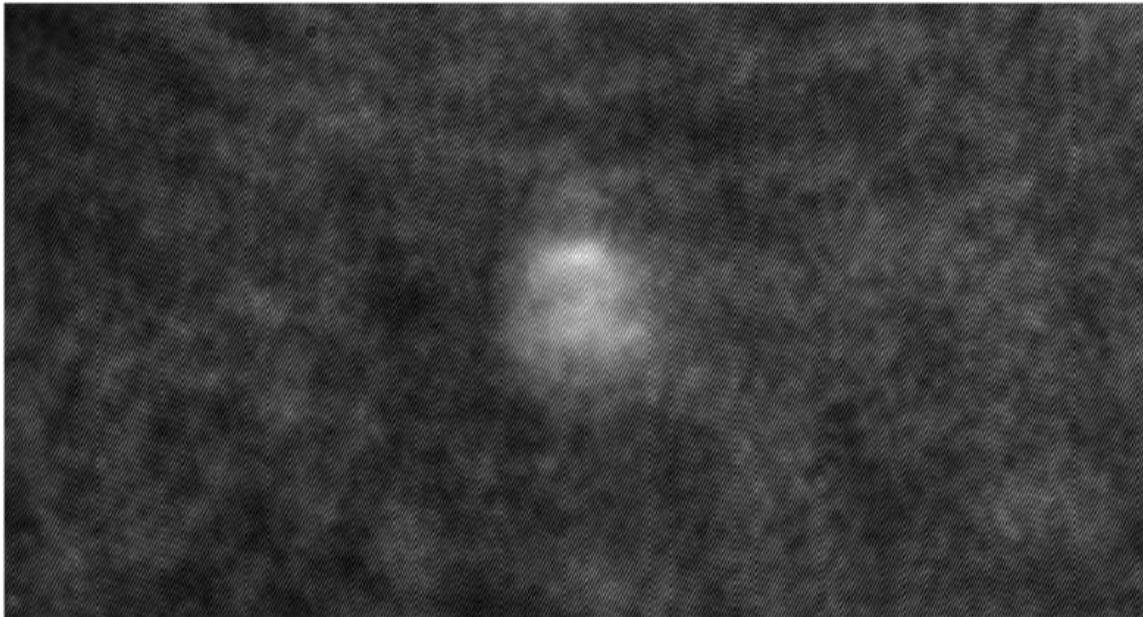
Este proceso permitió ajustar el método de procesamiento de imágenes, asegurando que las reconstrucciones fueran adecuadas para la obtención de la fase. Las pruebas preliminares, realizadas con estos hologramas, tuvieron como objetivo principal verificar que el programa computacional pudiera reconstruir los hologramas y estos tuvieran la calidad necesaria para su posterior análisis. Aunque estas pruebas no estaban directamente enfocadas en el fenómeno de lente térmica, fueron útiles para garantizar que el sistema y el procesamiento fueran adecuados para estudiar el fenómeno de lente térmica y presión óptica en etapas posteriores.

Como parte del análisis del fenómeno de lente térmica, se capturaron hologramas específicos para confirmar que se estuviera observando correctamente el área de interacción del pulso láser. En este contexto, se registraron dos hologramas principales: uno de referencia, tomado antes de la aplicación del pulso, y otro capturado durante la interacción del haz de excitación con la muestra. Las diferencias cualitativas observadas entre ambos hologramas proporcionaron evidencia preliminar de las variaciones en las franjas de interferencia, vinculadas a los gradientes térmicos inducidos en el medio.

En la Figura 4.2, se presentan ambos hologramas, resaltando las diferencias clave que proporcionan indicios iniciales de los cambios de fase. Como parte de las pruebas, se capturaron múltiples series de hologramas bajo diferentes condiciones experimentales para garantizar una caracterización del fenómeno. Estos datos fueron procesados digitalmente utilizando el método de espectro angular, que permitió recuperar mapas de fase para el análisis de las variaciones inducidas en el medio.



(a) Holograma de referencia capturado antes de la excitación del medio.



(b) Holograma con perturbación capturado durante la interacción del láser con la muestra.

**Figure 4.2:** Comparación entre el holograma de referencia (4.2a) y el holograma con perturbación (4.2b). Las diferencias en las franjas de interferencia evidencian las modificaciones inducidas en el medio por el fenómeno de lente térmica.

## 4.2. Comparación entre resultados teóricos y experimentales

### 4.2.1. Análisis del cambio de fase tras 10 segundos de excitación

Para evaluar la capacidad del sistema holográfico en la captura de cambios de fase inducidos por el fenómeno de lente térmica, se compararon los resultados experimentales con el modelo teórico descrito en el capítulo 2. En este análisis, se utilizó un tiempo de excitación de  $t = 10$  s, suficiente para generar un gradiente térmico significativo en la muestra. Este modelo teórico considera un diámetro de haz ajustado de  $w = 78,2 \mu\text{m}$  y un coeficiente de absorción promedio de  $\alpha = 2,4 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$  [16]. Dichos parámetros se determinaron con base en las condiciones experimentales previamente descritas, considerando las propiedades ópticas y térmicas del medio bajo estudio.

En la Figura 4.3, se muestra la comparación entre los resultados experimentales y teóricos del cambio de fase en función de la posición radial ( $r$ ), la simulación se realizó tomando los datos de la tabla 4.1. En la región central del haz ( $|r| \leq 40 \mu\text{m}$ ), los resultados experimentales muestran un comportamiento que empata con el modelo teórico presentado, sugiriendo que el sistema holográfico es capaz de registrar cambios de fase asociados a gradientes térmicos en medios líquidos bajo las condiciones controladas. Este resultado, aunque alentador, no constituye una validación definitiva del modelo, ya que las variaciones observadas entre diferentes series de hologramas capturados dificultan la reproducibilidad de los resultados.

Tabla 4.1: Parámetros utilizados para la simulación del cambio de fase teórico.

Parámetros utilizados en la simulación	
Longitud de onda	534 nm
Potencia del láser	2 W
Coefficiente de absorción	$2,4 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$
Tiempo de excitación	10 s
Radio del haz	$40 \mu\text{m}$
Cambio del índice de refracción	$4 * 10^{-4}$

En otras regiones, fuera del eje central ( $|r| > 40 \mu\text{m}$ ), las discrepancias entre los datos experimentales y teóricos se hacen más evidentes. Mientras que la curva experimental tiende a estabilizarse, el modelo teórico predice un decrecimiento

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

continuo del cambio de fase. Estas diferencias pueden atribuirse a limitaciones en el sistema experimental y la configuración óptica utilizada.

Es importante señalar que el diseño del montaje experimental incluyó componentes ópticos adicionales, como divisores de haz y espejos, que no eran esenciales para la operación con una sola longitud de onda. Estos elementos pudieron haber introducido reflexiones internas y dispersión de energía, afectando tanto el contraste como la calidad de los hologramas obtenidos. Además, estos efectos podrían combinarse con otros factores externos, como ruido experimental, vibraciones y fluctuaciones en la intensidad del láser de 632 nm utilizado para generar los hologramas, exacerbando las limitaciones observadas.

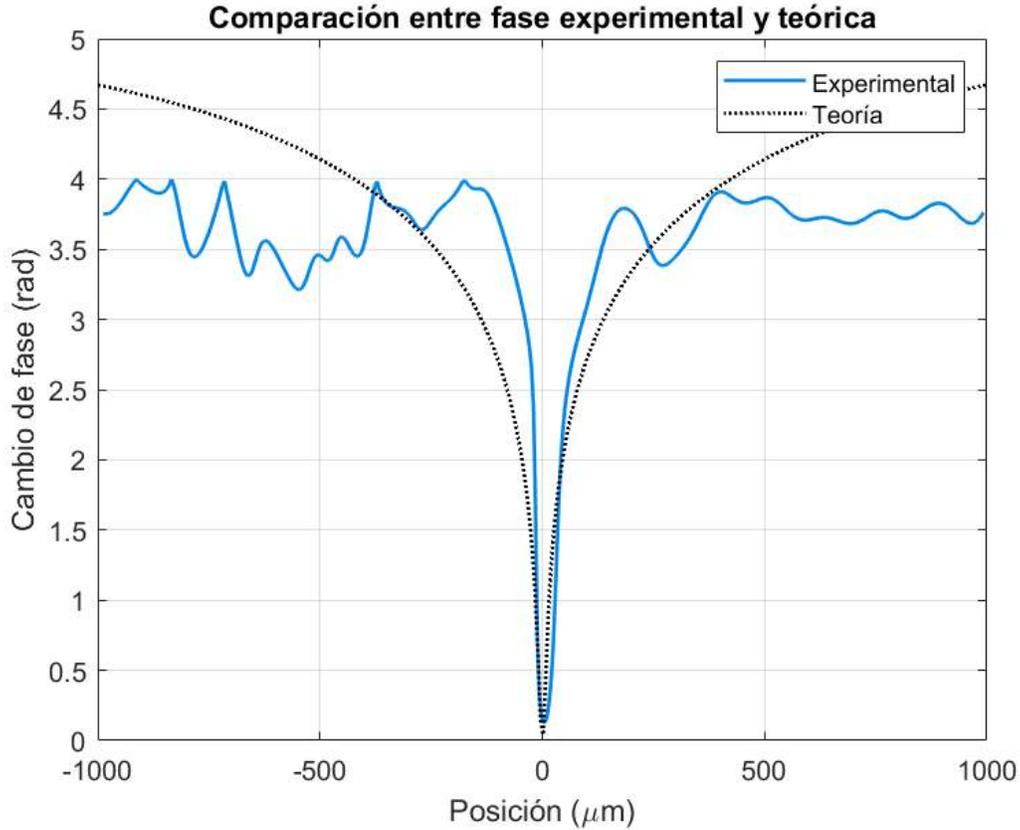
Otro aspecto relevante es que el láser de 632 nm ha sido empleado por más de 20 años, lo que hace esperable cierto grado de degradación en sus componentes internos, como el medio activo de láser, lo cual podría estar afectando su estabilidad y desempeño. Estas características, junto con la configuración actual, resaltan la necesidad de optimizar el sistema experimental para minimizar posibles pérdidas de energía, artefactos indeseados y discrepancias en los resultados.

La evaluación del sistema utilizando un *USAF 1951 Resolution Test Target* mostró que la resolución alcanzada, 90,5 lp/mm, permite identificar detalles en la región central. Sin embargo, esta resolución puede no ser suficiente para capturar variaciones más sutiles en las regiones alejadas del centro, lo que podría contribuir a las discrepancias observadas.

Además, las diferencias entre series capturadas ponen en evidencia la complejidad de reproducir los resultados bajo las condiciones actuales del montaje. Las fluctuaciones entre las mediciones sugieren que, aunque es posible observar coincidencias entre el modelo y los datos experimentales en ciertos casos, estas no son consistentes a lo largo de las series, lo que limita la interpretación de los resultados como una validación robusta del modelo teórico. Futuras mejoras en el diseño del montaje, la eliminación de componentes ópticas no esenciales y el control de las condiciones experimentales podrían reducir estas variaciones y permitir una comparación más precisa con el modelo teórico.

### 4.2.2. Dinámica del Cambio de Fase Posterior a la Excitación Térmica

Los resultados experimentales analizados en la sección previa han demostrado que el sistema holográfico es capaz de registrar cambios de fase inducidos por

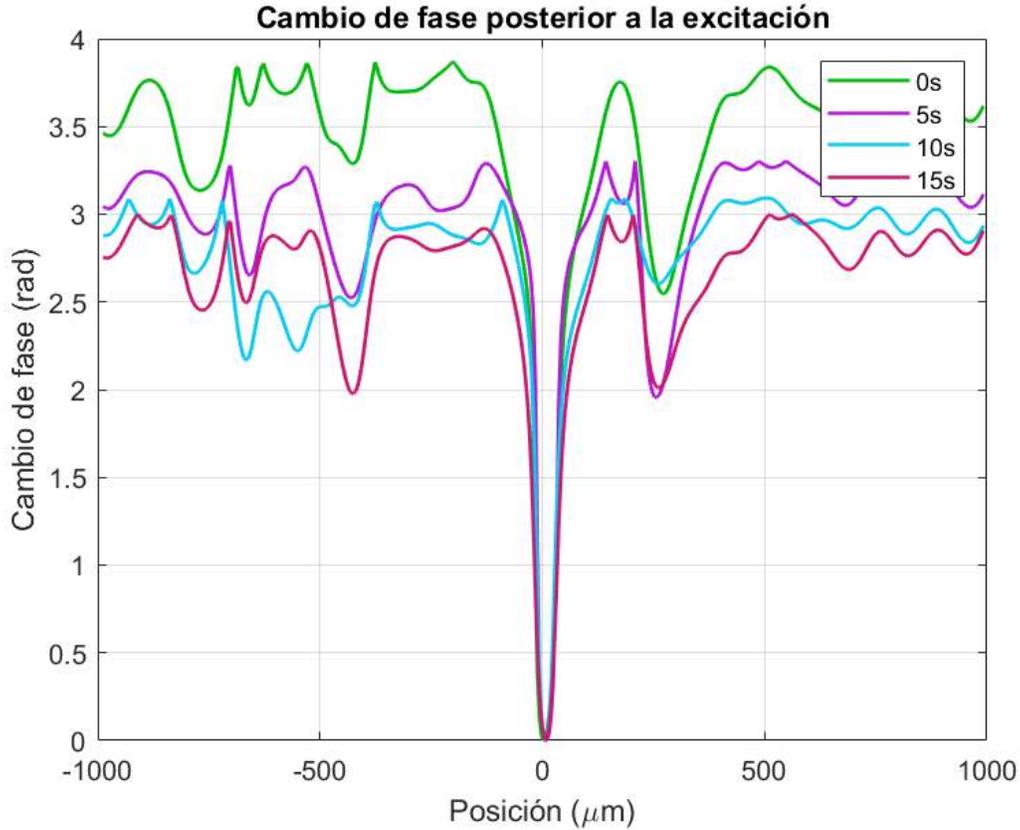


**Figure 4.3:** Comparación entre el cambio de fase teórico y experimental tras 10 segundos de excitación.

gradientes térmicos, especialmente durante la etapa inicial de relajación térmica. En esta sección, se presenta un análisis más detallado de la evolución temporal del cambio de fase posterior a la excitación, donde el tiempo  $t = 0$  s corresponde al momento en que han transcurrido 10 segundos desde que el pulso térmico alcanzó la muestra. Los valores reportados para  $t = 5$  s,  $t = 10$  s y  $t = 15$  s representan tiempos posteriores a este periodo inicial.

La figura 4.4 muestra la evolución del cambio de fase en función de la posición a lo largo de diferentes instantes de tiempo posteriores al inicio del periodo de relajación. Este análisis busca caracterizar cómo los gradientes térmicos se disipan progresivamente, lo que permite evaluar la respuesta del medio y la capacidad del sistema holográfico para monitorear estos cambios.

En el tiempo inicial ( $t = 0$  s, 10 segundos después del inicio de la excitación), el cambio de fase muestra picos marcadamente pronunciados, indicando que los gradientes térmicos aún persisten de manera significativa. Este comportamiento



**Figure 4.4:** Evolución del cambio de fase en función de la posición posterior a una excitación térmica en diferentes tiempos (0 s, 5 s, 10 s y 15 s). Se observa cómo la amplitud de las variaciones de fase disminuye con el tiempo, indicando la disipación térmica en el medio y la progresiva homogeneización del sistema.

sugiere que, aunque el pulso térmico ya no está presente, el medio continúa mostrando efectos residuales de la deformación térmica.

A medida que avanza el tiempo ( $t = 5\text{ s}$ ,  $t = 10\text{ s}$  y  $t = 15\text{ s}$ ), se observa una disminución gradual en la amplitud de las variaciones de fase, con una tendencia hacia una distribución más homogénea. Este fenómeno refleja el proceso de disipación térmica en el medio, donde las diferencias de temperatura y densidad tienden a equilibrarse progresivamente. La región central ( $x \approx 0\ \mu\text{m}$ ) sigue mostrando los cambios de fase más significativos, lo que sugiere que esta área concentra la mayor intensidad térmica inicial.

A  $t = 15\text{ s}$ , las variaciones de fase son menores en comparación con los tiempos anteriores, esto es consistente con la disipación progresiva de los gradientes térmicos esperados en medios líquidos. Este comportamiento es congruente con lo predicho

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

por los modelos teóricos [16], lo que sugiere que el sistema puede registrar las variaciones de fase posteriores a la excitación.

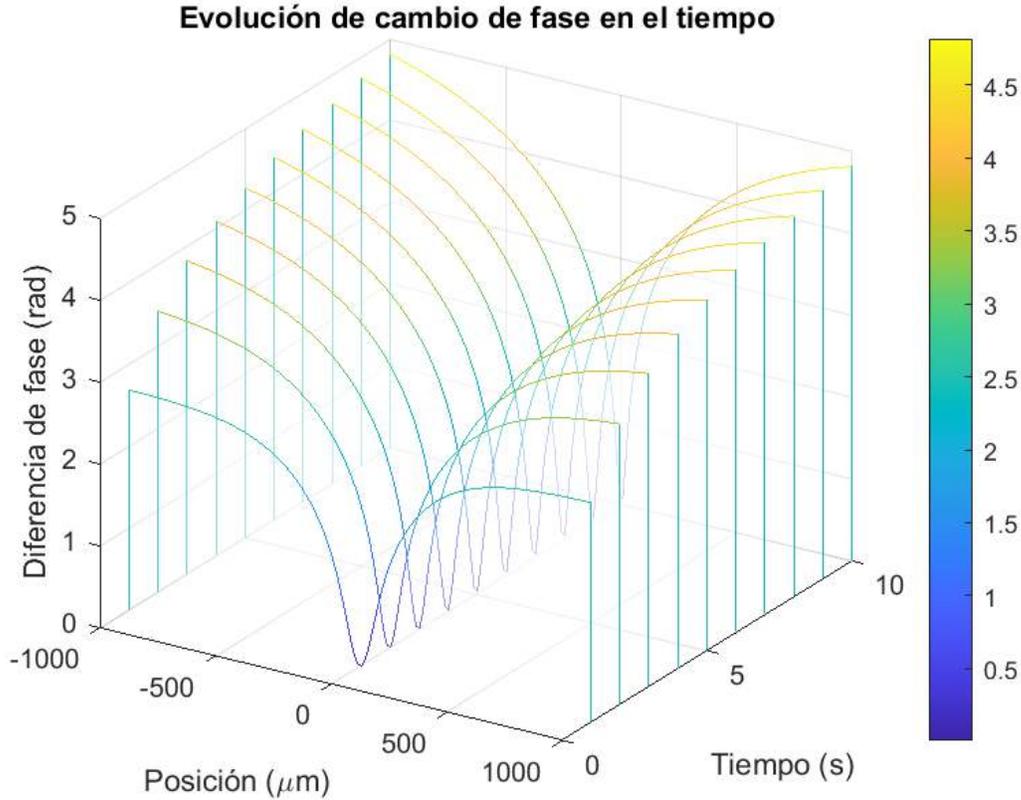
La capacidad del sistema para registrar cambios de fase en respuesta a gradientes térmicos valida su funcionalidad dentro de las condiciones experimentales establecidas. La correlación observada entre los resultados experimentales y las predicciones teóricas confirma que el sistema puede medir variaciones de fase, lo que refuerza su potencial como herramienta de análisis. Esto resulta relevante, ya que la capacidad de medir los cambios de fase inducidos por el fenómeno de lente térmica proporciona un antecedente técnico para alcanzar el objetivo final del proyecto: implementar esta configuración en estudios futuros enfocados en la medición de magnitudes físicas asociadas a deformaciones no destructivas en biomateriales, como los hidrogeles.

Futuras mejoras en la configuración experimental, como la reducción del ruido y la optimización de los componentes ópticos, podrían aumentar la precisión y reproducibilidad del sistema, fortaleciendo su aplicación en contextos más complejos y desafiantes.

### 4.3. Cambios de fase: análisis teórico y limitaciones experimentales

El análisis teórico del fenómeno de lente térmica permitió modelar la evolución temporal de los cambios de fase en función de la posición radial y el tiempo de exposición al láser de excitación. Como se muestra en la Figura 4.5, el modelo predice que el cambio de fase alcanza un valor máximo aproximado de 4,5 rad tras 10 segundos de exposición con una potencia de 2W. Este resultado proporciona una referencia inicial para interpretar las mediciones experimentales y evaluar la capacidad del sistema holográfico. Además, el modelo indica que, al aumentar el tiempo de exposición, las deformaciones térmicas se concentran en regiones cercanas al eje del haz, comportamiento consistente con el efecto acumulativo del calor generado por la absorción térmica del láser. Sin embargo, las mediciones experimentales lograron reproducir parcialmente este comportamiento, especialmente en la región central del haz, donde se observa una buena correspondencia con las predicciones teóricas. No obstante, en las regiones alejadas del eje central, las discrepancias entre los resultados teóricos y experimentales se hacen más evidentes.

Entre las posibles limitaciones experimentales se encuentra la sensibilidad del sistema a vibraciones externas, lo que afecta la estabilidad del interferómetro y



**Figure 4.5:** Evolución teórica del cambio de fase térmico ( $\phi$ ) en función de la posición radial y el tiempo de exposición. La gráfica muestra cómo las deformaciones térmicas se concentran en regiones cercanas al eje del haz con el aumento del tiempo de exposición.

genera ruido que complica la interpretación precisa de los hologramas. Además, la configuración óptica utilizada, diseñada originalmente para operar con tres longitudes de onda, no fue completamente optimizada para trabajar con una sola longitud de onda. Aunque la configuración inicial ofrecía ventajas importantes, como mejorar la resolución mediante el promediado del moteado en la imagen, desensibilizar el método haciéndolo más robusto, evitar problemas de ambigüedad de signo en la fase [28], e incrementar la resolución del sistema, se optó por utilizar una sola longitud de onda debido a que no era posible medir los cambios de fase con el arreglo estructurado de esta manera. Por limitaciones de tiempo, se decidió mantener la configuración con algunos componentes ópticos adicionales, como divisores de haz ( $BS_3$  y  $BS_4$ ), lo que introdujo reflexiones internas y dispersión de energía, afectando tanto la calidad de los hologramas como la precisión de los datos.

## *CAPÍTULO 4. RESULTADOS*

Por otro lado, la resolución del sistema, determinada como 90,5lp/mm, fue adecuada para identificar detalles en la región central de los hologramas, pero podría no ser suficiente para detectar deformaciones térmicas más localizadas en regiones alejadas del centro. Esta limitación podría explicar parcialmente las discrepancias observadas entre los resultados experimentales y teóricos. Además, la presencia de ruido experimental y fluctuaciones en la intensidad del láser pudo haber contribuido a la falta de reproducibilidad entre series de mediciones.

Las observaciones realizadas resaltan la necesidad de implementar mejoras tanto en el montaje experimental como en el procesamiento de datos para abordar estas limitaciones. Optimizar la configuración óptica eliminando componentes no esenciales y utilizando recubrimientos antirreflectantes podría reducir las reflexiones internas y las aberraciones ópticas. Asimismo, un control más preciso de la alineación del sistema óptico y el aislamiento de vibraciones externas contribuirían significativamente a mejorar la estabilidad y calidad de los hologramas capturados. En cuanto al procesamiento de datos, explorar algoritmos avanzados de eliminación de ruido y técnicas específicas de filtrado permitiría minimizar las aberraciones causadas por las reflexiones internas y las fluctuaciones en la intensidad del láser. Además, la incorporación de herramientas de calibración más precisas y pruebas adicionales en condiciones controladas fortalecerán la reproducibilidad de los resultados experimentales, permitiendo una validación más robusta del sistema.

El análisis realizado confirma que el sistema holográfico tiene el potencial de medir cambios de fase asociados a fenómenos térmicos. Sin embargo, también enfatiza que las limitaciones actuales deben ser abordadas para garantizar una mayor precisión y reproducibilidad. En trabajos futuros, un sistema optimizado no solo facilitará el análisis de fenómenos térmicos en medios líquidos, sino que también permitirá extender su aplicación a medios biológicos, como hidrogeles, para caracterizar deformaciones no destructivas y estudiar sus propiedades físicas de manera detallada.

## *CAPÍTULO 4. RESULTADOS*

# Capítulo 5

## Conclusiones y trabajo futuro

El presente trabajo se centró en el desarrollo y validación de un sistema holográfico digital utilizando el fenómeno de lente térmica como modelo experimental. Los resultados obtenidos permitieron evaluar la capacidad del sistema para registrar cambios de fase inducidos por gradientes térmicos en medios líquidos, estableciendo un punto de partida sólido para aplicaciones futuras.

En primer lugar, se demostró que el sistema holográfico basado en un interferómetro de Mach-Zehnder es capaz de capturar hologramas de buena calidad, lo que permitió la reconstrucción de los mapas de fase mediante el método de espectro angular. Este enfoque no solo confirmó la sensibilidad del sistema a las variaciones térmicas inducidas, sino que también destacó la robustez del montaje experimental en condiciones controladas.

La comparación entre los resultados experimentales y teóricos mostró una buena correlación en las regiones centrales del haz, confirmando la capacidad del sistema para registrar las dinámicas térmicas en medios líquidos. Sin embargo, las discrepancias observadas en las regiones alejadas del eje del haz evidenciaron las limitaciones de la configuración óptica utilizada, principalmente debido a reflexiones internas y dispersión de energía introducidas por componentes no esenciales en el montaje, así como el no utilizar las lentes formadoras de imagen ideales debido a que no se contaba con las monturas con los grados de libertad necesarios para poder realizar el enfoque de manera precisa. Estas observaciones resaltan la importancia de optimizar el diseño experimental para mejorar la consistencia de los resultados.

Adicionalmente, el análisis del periodo de relajación térmica posterior a la excitación permitió evaluar la dinámica temporal de la disipación térmica, confirmando la capacidad del sistema para monitorear cambios de fase progresivos.

## *CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES*

Este comportamiento es consistente con lo predicho por los modelos teóricos, validando el enfoque experimental y estableciendo las bases para futuras investigaciones.

El uso del fenómeno de lente térmica como modelo experimental proporcionó una herramienta efectiva para validar la funcionalidad del sistema holográfico. Aunque el objetivo principal no era caracterizar este fenómeno en detalle, los resultados obtenidos confirman que el sistema desarrollado es adecuado para medir cambios de fase asociados a deformaciones ópticas. Esto abre la posibilidad de aplicar esta configuración en estudios más complejos, como la caracterización de biomateriales, incluyendo hidrogeles, para medir magnitudes físicas relacionadas con deformaciones no destructivas.

Finalmente, este trabajo demuestra que la holografía digital es una técnica poderosa y versátil para el análisis de fenómenos ópticos en medios líquidos. Las mejoras propuestas, como la optimización del montaje y el desarrollo de algoritmos avanzados de procesamiento de datos, permitirán extender la aplicación del sistema a un rango más amplio de estudios, estableciendo su utilidad como un sistema eficaz para la caracterización de propiedades ópticas y térmicas en diversas aplicaciones.

En futuras investigaciones, sería relevante explorar la integración del sistema holográfico con configuraciones automatizadas que permitan una mayor estabilidad y precisión en la captura de hologramas bajo condiciones experimentales más diversas. Asimismo, el diseño de pruebas específicas para medios complejos, como biomateriales tipo hidrogeles, podría permitir una validación más directa de las capacidades del sistema en la detección de deformaciones inducidas. Adicionalmente, sería de interés ampliar el rango de fenómenos estudiados, incluyendo aquellos que involucren gradientes térmicos y mecánicos simultáneos, con el fin de evaluar la sensibilidad del sistema a múltiples interacciones. Estas líneas de investigación no solo fortalecerían las capacidades actuales del montaje, sino que también abrirían nuevas oportunidades para su aplicación en otros campos.

# Bibliografía

- [1] Dennis Gabor. A new microscopic principle. *Nature*, 161:777–778, May 1948.
- [2] Dennis Gabor. Microscopy by reconstructed wave-fronts. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 197(1051):454–487, 1949.
- [3] Emmett N. Leith and Juris Upatnieks. Reconstructed wavefronts and communication theory. *Journal of the Optical Society of America*, 52(10):1123–1130, 1962.
- [4] Charles H Townes. Production of coherent radiation by atoms and molecules. *Science*, 149(3686):831–841, 1965.
- [5] N. G. Basov and A. M. Prokhorov. The development of semiconductor lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1(1):1–12, 1964.
- [6] Mitsuo Takeda, Wei Wang, Zhihui Duan, and Yoko Miyamoto. Coherence holography. *Optics express*, 13(23):9629–9635, 2005.
- [7] Emmett N. Leith and Juris Upatnieks. Wavefront reconstruction with diffused illumination and three-dimensional objects\*. *J. Opt. Soc. Am.*, 54(11):1295–1301, Nov 1964.
- [8] Emmett N. Leith and Juris Upatnieks. Modern Holography. In Bernard G. Pongeggi and Brian J. Thompson, editors, *Holography I*, volume 0015, pages 13 – 20. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 1968.
- [9] U. Schnars and W. Jüptner. Direct recording of holograms by a ccd target and numerical reconstruction. *Appl. Opt.*, 33(2):179–181, Jan 1994.
- [10] U. Schnars and W. Jüptner. *Digital Holography: Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques*. Springer Berlin Heidelberg, 2005.

## BIBLIOGRAFÍA

- [11] Joseph W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics*. Roberts and Company Publishers, 2005.
- [12] Thomas Kreis. *Handbook of holographic interferometry: optical and digital methods*. WILEY-VCHGmbH&Co.KGaA, 2005.
- [13] U. Schnars and W. Jüptner. Digital recording and numerical reconstruction of holograms. *Measurement Science and Technology*, 13(9):R85–R101, 2002.
- [14] Pierre Marquet, Benjamin Rappaz, Pierre J. Magistretti, Etienne Cuhe, Yves Emery, Tristan Colomb, and Christian Depeursinge. Digital holographic microscopy: a noninvasive contrast imaging technique allowing quantitative visualization of living cells with subwavelength axial accuracy. *Opt. Lett.*, 30(5):468–470, Mar 2005.
- [15] Björn Kemper and Gert von Bally. Digital holographic microscopy for live cell applications and technical inspection. *Appl. Opt.*, 47(4):A52–A61, Feb 2008.
- [16] David C. Clark and Myung K. Kim. High-precision method for measuring the photothermal properties of transparent media with digital holography (invited paper). *Chin. Opt. Lett.*, 9(12):120001, Dec 2011.
- [17] Jianglei Di, Yang Yu, Zhaomin Wang, Weijuan Qu, Chee Yuen Cheng, and Jianlin Zhao. Quantitative measurement of thermal lensing in diode-side-pumped nd:yag laser by use of digital holographic interferometry. *Opt. Express*, 24(25):28185–28193, Dec 2016.
- [18] Krzysztof Dobek. Thermal lensing: outside of the lasing medium. *Applied Physics B*, 128(2):18, 2022.
- [19] Eugene Hecht. *Optics*. Pearson, 2017.
- [20] Sungbin Jeon, Janghyun Cho, Ji nan Jin, No-Cheol Park, and Young-Pil Park. Dual-wavelength digital holography with a single low-coherence light source. *Opt. Express*, 24(16):18408–18416, Aug 2016.
- [21] Guy Indebetouw and Prapong Klysubun. Imaging through scattering media with depth resolution by use of low-coherence gating in spatiotemporal digital holography. *Optics Letters*, 25(4):212–214, 2000.
- [22] Jung-Ping Liu, Tatsuki Tahara, Yoshio Hayasaki, and Ting-Chung Poon. Incoherent digital holography: a review. *Applied sciences*, 8(1):143, 2018.

## BIBLIOGRAFÍA

- [23] Soenke Seebacher, Wolfgang Osten, and Werner P. O. Jueptner. Measuring shape and deformation of small objects using digital holography. In Ryszard J. Pryputniewicz, Gordon M. Brown, and Werner P. O. Jueptner, editors, *Laser Interferometry IX: Applications*, volume 3479, pages 104 – 115. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 1998.
- [24] Y.Y. Hung, HuaiMin Shang, and Lian Xiang Yang. Unified approach for holography and shearography in surface deformation measurement and nondestructive testing. *Optical Engineering*, 42(5):1197 – 1207, 2003.
- [25] AV Belashov, NV Petrov, and IV Semenova. Digital off-axis holographic interferometry with simulated wavefront. *Optics express*, 22(23):28363–28376, 2014.
- [26] Myung K. Kim. Principles and techniques of digital holographic microscopy. *SPIE Reviews*, 1(1):018005, 2010.
- [27] Jun Shen, Roger D Lowe, and Richard D Snook. A model for cw laser induced mode-mismatched dual-beam thermal lens spectrometry. *Chemical physics*, 165(2-3):385–396, 1992.
- [28] Nazif Demoli, Dalibor Vukicevic, and Marc Torzynski. Dynamic digital holographic interferometry with three wavelengths. *Opt. Express*, 11(7):767–774, Apr 2003.